

文章编号:1673-5005(2010)01-0084-09

油井选择性堵水

赵福麟*

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:为控制水从油层产出,建立找水堵水法和不找水堵水法。由于不需找水并能从油层深部控制水的产出,所以不找水堵水法更为重要。不找水堵水法使用选择性堵剂和堵剂选择性注入工艺,达到油井选择性堵水的目的。介绍了选择性堵剂的类型和作用机制,分析堵剂选择性注入工艺中如何利用出水层的特征(高渗透、低流动阻力、高含水饱和度和易于泄压),将堵剂选择性地注入出水层,给出一些油井选择性堵水成功的矿场试验实例。不找水堵水法的应用和发展有广阔的前景。

关键词:油井; 堵水; 选择性封堵

中图分类号:TE 254.4 **文献标志码:**A

Selective water shutoff for oil well

ZHAO Fu-lin

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: For controlling water production from oil-bearing formation, water shutoff methods with and without water detection were developed. Because water detection doesn't need to be done and water production can be controlled in deep oil bearing formation, the latter method was more important and was reviewed here. In order to select water shutoff for oil well, the selective plugging agents and selective injection technologies were applied. The selective plugging agents and their action mechanisms were introduced, and how to utilize the characteristics of water production formation (high permeability, low flow resistance, high water saturation and easy to release pressure) and inject the plugging agent selectively into formation was analyzed. Some successful selective water shutoff pilot tests were given. This illustrates that water shutoff without water detection has a wide prospect of application and development.

Key words: oil well; water shutoff; selective plugging

水是驱油的动力,油藏开发过程中不可避免地有水从油层产出,由于地层渗透率的不均质性,水是沿着高渗透层侵入油井的。为了保持地层能量,需要从油井封堵高渗透层,控制水的产出。有两类堵水法,即找水堵水法和不找水堵水法。前者立足于找水,首先将油井中产水的位置找准,然后将此位置堵住,控制水的产出;后者则立足于使用选择性堵剂和堵剂选择性注入工艺,通过堵剂的独特性质和发挥注入工艺的智能作用,达到不找水堵水的目的。笔者综述油井的不找水堵水法中用到的选择性堵剂、堵剂的注入工艺,给出一些成功的矿场试验例。

1 油井选择性堵剂

油井选择性堵剂是指对水有高的流动阻力、对油有低的流动阻力的物质,它主要利用油与水的差别、出油层与出水层的差别起选择性堵水作用。

若以配制堵剂的溶剂或分散介质分类,油井选择性堵剂可分为水基堵剂、油基堵剂和醇基堵剂。有11类重要的选择性堵剂。

1.1 水溶性聚合物(水基堵剂)

聚丙烯酰胺水溶液是一类典型的选择性堵剂^[1-2]。图1说明聚丙烯酰胺水溶液对水和油有不

收稿日期:2009-12-10

作者简介:赵福麟(1933-),男(汉族),广东广州人,教授,博士生导师,长期从事油田化学教学和科研工作。

* 参加工作的还有陈凯、吕凯。

同的渗透率降低率。

图1 聚丙烯酰胺水溶液对油和水的选择性^[3-7]

Fig.1 Selective behavior for oil and water of polyacrylamide solution

图2说明聚丙烯酰胺对油和水相对渗透率有不同程度降低的原因。

聚丙烯酰胺可通过下列改性提高它对水的控制

能力:①在主链中引入聚氧乙烯丙烯酰胺链节或甲基醚聚氧乙烯丙烯酰胺链节,增加亲水基团水化层的厚度和向水层的伸展能力^[8];②在主链中引入有疏水基(如 $C_8H_{17}-$ ~ $C_{10}H_{21}-$)的丙烯酰胺链节,提高它在岩石表面的吸附量^[9-10];③在主链中引入阳离子链节(如季铵基链节),提高它在岩石表面的耐冲刷能力^[11]。

由于聚丙烯酰胺(包括加有少量交联剂的聚丙烯酰胺)可改善油和水的相对渗透率,因此它属于一类称为相对渗透率改进剂(RPM, relative permeability modifier)的选择性堵水剂^[12-16]。

1.2 水基冻胶(水基堵剂)

水基冻胶^[17-22]是由交联剂将溶于水中的聚合物分子交联生成。铬冻胶与酚醛树脂冻胶是广泛使用的冻胶型选择性堵剂。

近年来,也有使用聚乙烯亚胺交联丙烯酰胺与特丁基丙烯酸盐的共聚物所产生的冻胶,在较苛刻的油藏条件进行选择堵水的^[23-24]。

图2 聚丙烯酰胺选择性堵水机制

Fig.2 Selective water shutoff mechanism of polyacrylamide

水基冻胶对油和水有不同流动阻力的事实已被证实(图3)。

图3 水基冻胶对油和水的选择性^[25-26]

Fig.3 Selective behavior for oil and water of water-base gel

水基冻胶之所以对油和水有不同流动阻力可通过膨胀/收缩机制(图4)^[27]和油水分流机制(图5)^[28]说明。

为了提高冻胶耐温耐盐性能,研究了用丙烯酰胺-丙烯酸-(2-丙烯酰胺基-2-甲基)丙基磺酸盐共聚

物和丙烯酰胺-丙烯酸-N-乙烯吡咯烷酮共聚物制备冻胶;为了使冻胶环境友好,研究了用生物聚合物(如黄胞胶、硬葡聚糖)制备冻胶,用聚乙烯亚胺、脱乙酰几丁质交联聚合物^[29]。

可用乳化、喷雾或剪切的方法,将冻胶制成微球,再将这些微球分散在水中配得冻胶分散体。若将这些冻胶分散体注入油层,则可通过微球在高渗透层壁上粘附起选择性堵水作用。冻胶微球用于选择性堵水是近年值得注意的一种发展动向^[30-33]。

1.3 水基泡沫(水基堵剂)

水基泡沫^[34-36]是以水作分散介质,以气体作分散相,以表面活性剂为起泡剂,以聚合物为稳泡剂的分散体系。水可以是淡水或盐水,气体可以是氮气或二氧化碳气,表面活性剂一般用硫酸盐型、磺酸盐型和非离子-阴离子型表面活性剂,聚合物则用一般

的水溶性聚合物如聚丙烯酰胺或羧甲基纤维素。

1.4 水包稠油(水基堵剂)

水包稠油^[38-42]是以水作分散相,以稠油作分散介质,以水溶性表面活性剂作乳化剂的分散体系。

由于稳定水包稠油的水溶性表面活性剂在地层表面的吸附,使油水界面吸附量随之减少,所以水包稠油进入地层一定距离后即破乳。破乳后的稠油充填在地层孔隙中起封堵作用。水包稠油是水基堵剂,它优先进入高含水的高渗透层,并在其中产生堵塞,因此水包稠油是一种选择性堵剂。

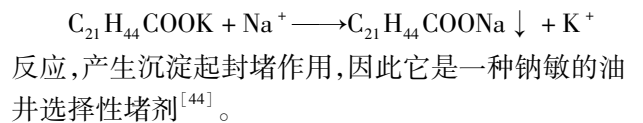
若将聚丙烯酰胺溶液取代水,配成聚丙烯酰胺溶液包稠油乳状液,然后用它堵水,则这种选择性堵剂除了水包稠油的选择性堵水作用外,还将兼有聚丙烯酰胺溶液的选择性堵水作用^[43]。

1.5 水溶性皂(水基堵剂)

皂是长链羧酸与碱的反应产物。有两类水溶性皂:

① 脂肪酸皂。脂肪酸皂的通式为 RCOOM,式中 R 为 C₈ ~ C₂₀ 烷烃, M 为 Na, K, 它能与水中的 Ca²⁺, Mg²⁺ 反应产生沉淀起封堵作用。由于它是水基堵剂,能优先进入高含水的高渗透层,并能与水中的 Ca²⁺, Mg²⁺ 反应产生沉淀起封堵作用,因此是一种钙镁敏的油井选择性堵剂。

在脂肪酸皂中,有一种钾皂特别值得注意,它叫山嵛酸钾,分子式为 C₂₁H₄₄COOK。它可溶于水注入地层,当它遇地层水中的 Na⁺, 即发生



② 烷酸皂。环烷酸皂通式为

它类似脂肪酸皂,是一种钙镁敏的油井选择性堵剂。

1.6 水溶性硅酸盐(水基堵剂)

水溶性硅酸盐^[45-49]主要用硅酸钠。硅酸钠的水溶液称为水玻璃。硅酸钠的分子式为 Na₂O · mSiO₂, 式中 m 为模数。模数是指硅酸根的聚合度。由于水玻璃中溶有不同模数的硅酸钠,所以它的平均模数不是整数。

可从下列方面说明水玻璃是理想的高温高盐底水油藏油井堵水的选择性堵剂:①水玻璃是一种水基堵剂,它将优先沿底水入侵的通道进入底水层。②水玻璃密度高,有利它沿底水入侵的通道下沉至底水层。③水玻璃具有盐敏的特性,当与高矿化度

图4 解释水基冻胶对油、水选择性的膨胀/收缩机制

Fig. 4 Expansion/shrinkage mechanism for interpreting selective behavior for oil and water of water-base gel

图5 解释水基冻胶对油、水选择性的油水分流机制
Fig. 5 Oil and water divided-flow mechanism for interpreting selective behavior for oil and water of water-base gel

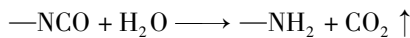
水基泡沫在水中稳定,通过贾敏效应的叠加起封堵高渗透层的作用,但在油中则不稳定,起泡剂从气液表面转移到油水界面引起泡沫破坏。

若在分散介质中加入交联剂,它在一定的时间内将分散介质中的聚合物分子交联,使水基泡沫转变为冻胶泡沫,提高了这种堵剂的稳定性。已对这种冻胶泡沫封堵性能的影响因素进行了研究^[37]。

的底水相遇可产生沉淀,阻止底水流动。④水玻璃具有钙镁敏的特性,它可与 Ca^{2+} , Mg^{2+} 产生阻止底水流动的沉淀反应。⑤水玻璃具有酸敏的特性,若底水呈酸性(由 H_2S 和 CO_2 存在产生),水中的 H^+ 与硅酸钠反应,产生硅酸溶胶,经过一定时间,可胶凝成为硅酸凝胶,阻止底水流动。⑥水玻璃具有热敏特性,在高温地层,经过一定时间,水玻璃的沉淀量逐渐增加,对底水流动有抑制作用。

1.7 聚氨基甲酸酯油溶液(油基堵剂)

聚氨基甲酸酯^[50]是多羟基化合物和多异氰酸酯聚合而成。聚合时,保持异氰酸基($-\text{NCO}$)的数量超过羟基($-\text{OH}$)的数量,即可制得有选择性堵水作用的聚氨基甲酸酯。当有过剩的异氰酸基遇水即可发生反应产生氨基和二氧化碳:



所产生的氨基可继续与异氰酸基作用,生成脲键:

脲键上还有活泼氢,它们还可以与其他未反应的异氰酸基反应使原来可流动的线型聚氨基甲酸酯最后变成不能流动的体型聚氨基甲酸酯,将出水堵住。

1.8 四羟基原硅酸酯油溶液(油基堵剂)

四羟基原硅酸酯^[51-53]通式为 $\text{Si}(\text{OR})_4$, 式中 R 为烃基。 $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$ 是一种四羟基原硅酸酯,它遇水水解、缩聚、再水解、再缩聚,失去流动性,起堵水作用:

四羟基原硅酸酯是配成油溶液使用。

1.9 烃基卤代甲硅烷油溶液(油基堵剂)

烃基卤代甲硅烷通式为 $\text{R}_n\text{SiX}_{4-n}$, 式中 R 为烃基, X 为卤素, n 为 1~3 的整数。 $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$ 是一种烃基卤代甲硅烷,它与水反应生成硅醇,而硅醇中的多元醇很易缩聚,生成聚硅醇沉淀,起堵水作用。由于烃基卤代甲硅烷是油溶性的,所以他们必须配

成油溶液使用。

1.10 油基水泥(油基堵剂)

油基水泥^[54]是水泥在油中的悬浮体。当将油基水泥注入出水层时,由于水泥表面亲水,所以水可置换水泥表面的油而与水泥作用,使它固化,封堵出水层。配油基水泥的水泥可根据地层温度选用不同温度级别的油井水泥。配油基水泥的油可用煤油、柴油或低黏度煤油。

1.11 松香二聚物醇溶液(醇基堵剂)

松香可在硫酸作用下聚合,生成松香二聚物^[55]。由于松香二聚物易溶于低分子醇(例如乙醇)而不溶于水,所以当松香二聚物的醇溶液与水相遇,水即溶于醇中,降低了它对松香二聚物的溶解度,使松香二聚物饱和析出,起堵水作用。因此松香二聚物醇溶液是一种选择性堵剂。

2 堵剂的选择性注入方法

可通过下列方法^[56-58]达到堵剂选择性注入的目的:

(1)利用地层的渗透率。地层的渗透率是不均质的,堵剂注入时,由于高渗透层的流动阻力小,所以堵剂主要进入高渗透层。通常高渗透层是高含水层,正是需要堵剂在其中起封堵作用,因此可利用地层不同的渗透率,达到堵剂选择性注入的目的。

(2)利用地层的含水饱和度。地层中含水(或含油)饱和度也是不均质的,在不同含水饱和度下,地层对油和水有不同的渗透率。含水饱和度越高,地层对水的渗透率越高。当将水基堵剂注入地层,由于地层中出水的部位对水基堵剂的渗透率高,它将优先进入这些部位,起选择堵水作用。因此,利用地层含水饱和度的不同可达到选择性堵水的目的。

(3)利用堵剂的注入压力。地层中不同渗透率的地层有不同的起动压力(开始吸收液体的压力)。高渗透层的起动压力低,中低渗透层的起动压力比高渗透层的起动压力高,因此只要将堵剂的注入压力控制在尽可能低的水平,堵剂将优先进入起动压力低的高渗透层(高含水层),达到选择性注入的目的。

(4)注水井的配合。油井堵水时,若得到对应注水井配合,则可实现堵剂的选择性注入。由于油井与注水井之间的联通有不同渗透率的地层,所以在油井堵水前关闭与油井联通好的注水井或投死嘴关闭与油井联通好的小层,则可使油井与注水井之

间地层的压力随时间降低。由于高渗透层的压力随时间降低比低渗透层的快,因此可在高渗透层的压力已经降低而低渗透层的压力还未降低的时候,从油井注入堵剂,堵剂将优先进入高渗透层,产生堵剂选择性注入的效果。

(5)出水层的预处理。出水层预处理的目的是进一步降低出水层的含油饱和度(即增加出水层的含水饱和度),提高出水层对水基堵剂的渗透性。若在堵水剂注入前,向地层注入高效洗油剂水溶液,它将优先进入出水层,将该层的油洗下,带到地层深处进一步提高出水层的含水饱和度,使水基堵剂更易进入该层。在一定浓度下,能与地层油产生超低界面张力的表面活性剂水溶液,均可用作高效洗油剂水溶液。为了提高高效洗油剂水溶液对洗下油的携带能力,它最好用水溶性聚合物(如聚丙烯酰胺)稠化。

3 油井选择性堵水的矿场试验实例

3.1 胜坨油田胜二区沙二3单元22N169井

22N169井^[59]1999年3月投产,油层中部深度1994.2 m,油层层数为1(3⁴层),油层厚度6.6 m,射孔厚度1.2 m,正韵律,油层温度75℃,日产液41

t,日产油1.3 t,产液中含水率96.6%,地层水矿化度为 1.65×10^4 mg/L,注入水。

22N169井产液属特高含水率,主要由于注入水沿3⁴层底部高渗透层侵入油井引起。为了控制注入水从该井产出,可将不同成冻时间的冻胶设置在3⁴层底部高渗透层的不同位置(包括近井地带、过渡地带和远井地带)。为了保证该井的产液量,用过顶替液将堵剂(不同成冻时间的冻胶)顶替至离井眼3 m。

堵剂的配方如下:①远井地带堵剂为0.25% HPAM + 0.80% 酚醛树脂预聚物;②过渡地带堵剂为0.30% HPAM + 1.00% 酚醛树脂预聚物;③井地带堵剂为0.35% HPAM + 0.10% 重铬酸钠 + 0.20% 亚硫酸钠。

上述3种配方堵剂的体积比为7:2:1。这次堵水,远井地带堵剂用量为410 m³,过渡地带堵剂为120 m³,近井地带堵剂为55 m³。

为了减少堵剂对油井产液的流动阻力,须用过顶替液将堵剂顶替至离井眼3 m以远。过顶替液黏度应高于被顶替堵剂的黏度。本井过顶替液配方为0.40% HPAM,用量为60 m³。

可从图6看到22N169井的堵水效果。

图6 胜坨油田22N169井的采油曲线

Fig. 6 Production curve of well 22N169 in Shengtuo Oilfield

3.2 火烧山油田H3层H1304井

H1304井^[60]1988年10月投产,采油层位为H3,采油层段为1482.5~1538.0 m,射开厚度19.5 m,油层温度55℃,日产液量14.4 t,日产油量1.4 t,产液中含水率为90.4%。

侵入H1304井的水为注入水。由于产液中含

水率高,先后在2005年11月和2006年6月进行了冻胶泡沫堵水,两次施工注入的工作液配方和用量见表1。

堵水前后的采油曲线见图7。

从图7可以看到,H1304井的堵水施工取得很好的效果。

表 1 H1304 井施工用的工作液
Table 1 Working liquid for construction of well H1304

堵水施工	工作液	配方	用量 V/m ³	
第一次	高效洗油剂	0.50% YG220 ^①	39.0	
	远井冻胶起泡液	0.25% HPAM } +9% Na ₂ Cr ₂ O ₇ +0.16% Na ₂ SO ₃ +0.30% YG240 ^②	97.5	
	过渡冻胶起泡液		0.30% HPAM	58.5
	近井冻胶起泡液		0.35% HPAM	39.0
	氮气	95% N ₂	9000.0	
	过顶替液	0.40% HPAM	78.0	
第二次	高效洗油剂	0.50% YG220	39.0	
	远井冻胶起泡液	0.25% HPAM } +9% Na ₂ Cr ₂ O ₇ +0.16% Na ₂ SO ₃ +0.30% YG240	146.0	
	过渡冻胶起泡液		0.30% HPAM	88.0
	近井冻胶起泡液		0.35% HPAM	58.0
	氮气	95% N ₂	1875.0	
	过顶替液	0.40% HPAM	78.0	

注:①以烷基酰二乙醇胺为主要成分的洗油剂;②以烷基硫酸酯盐为主要成分的起泡剂。

进入底水层。

(2)注隔离淡水,清洗近井地带地层,驱替底水上窜裂缝中的底水。

(3)注水溶性硅酸盐堵剂和粘土固化体系堵剂,这些堵剂将优先进入底水上窜的通道。

(4)注过顶替液(聚丙烯酰胺水溶液),将堵剂顶替至底水与油的界面附近。

(5)堵剂在温度、底水高矿化度和高钙镁含量作用下产生堵塞物,形成防止底水上窜的隔板。

2003年7月18日对LG101-2井进行了堵水施工,向地层注入淡水130 m³,水溶性硅酸盐58 m³,黏土固化体系35 m³,过顶替液60 m³。LG101-2井施工后取得了好的响应(图8)。从图4可以看到,该井的底水上窜受到控制。

图 7 H1304 井冻胶泡沫堵水前后的采油曲线

Fig. 7 Production curve of well H1304 before and after water shutoff by gel-foam

3.3 轮古油田 LG101-2 井

LG101-2 井^[61-62]2003 年 7 月投产,采油层段为 5 441 ~ 5 469 m,油层厚度 9 m,裸眼层段 5 434 ~ 5 475 m,油层温度 120 °C,底水矿化度 19.8 × 10⁴ mg/L,油水界面 5 587 m,岩性为碳酸盐岩。

2003 年 7 月 7 日对 LG101-2 井进行了酸压,但酸压使该井产油层与底水层沟通,引起油井产液中含水率大幅度升高。由于 LG101-2 井油层温度和底水矿化度高,所以控制底水时使用了高温高矿化度油藏的选择性堵剂——水玻璃。为了控制酸压产生的人工裂缝,在注水溶性硅酸盐之后注入黏土固化体系,其配方为 8% 钙土 + 8% 油井水泥。

通过下列步骤,在底水与油之间建立有一定延伸距离的隔板:

(1)开井恢复生产,至油井产液中含水率达到关井前的水平,形成底水入侵通道,有利于引导堵剂

图 8 LG101-2 井施工前后含水率对比

Fig. 8 Water cut contrast of well LG101-2 before and after water shutoff

油井选择性堵水,国外也有许多成功的矿场试验实例^[63-67]。

4 结束语

水是驱油的动力,油藏的开发过程中不可避免地有水从油层产出,为了控制水从油层产出,建立了找水堵水法和不找水堵水法。由于不需要找水,并

且能从油层深部控制水的产出,因此后一个堵水法更为重要。

不找水堵水法是通过使用选择性堵剂和堵剂选择性注入工艺,达到不找水堵水目的。在选择性堵剂中主要用水基堵剂(它将优先进入出水层),其中特别重要的选择性堵剂是RPM、冻胶(包括冻胶微球)、泡沫或它们的组合(如冻胶泡沫),对高温高矿化度油藏,最重要的选择性堵剂是水溶性硅酸盐。

选择性注入工艺主要利用出水层特征(高渗透、低流动阻力、高含水饱和度和易于泄压),将堵剂选择性地注入出水层。

油井选择性堵水成功的矿场试验实例说明油井选择性堵水有广阔的应用和发展前景。

参考文献:

- [1] ZAITOUN A, KOHLER N. Two-phase flow through porous media: effect of an adsorbed polymer layer[R]. SPE 18085, 1988.
- [2] ZAITOUN A, KOHLER N, GUERRINI Y. Improved polyacrylamide treatments for water control in production well[J]. JPT, 1991,43(7):862-867.
- [3] AVERY MR, WELLS TA. Field evaluation of a new gelant for water control in production wells[R]. SPE 18201, 1988.
- [4] SPARLIN D D. An evaluation of polyacrylamides for reducing water production[J]. JPT, 1976,28(8):906-914.
- [5] WHITE J L, GODDARD J E, PHILLIPS H M. Use of polymers to control water production in oil wells[J]. JPT, 1973,25(2):143-150.
- [6] SANDIFORD B B, GRAHAM G A. Injection of polymer solutions in producing wells[C]//AIChE Symposium Series, January, 1,1973,69(127):38-40.
- [7] SCHNEIDER F N, OWEN W W. Steady-state measurements of relative permeability for polymer/oil systems[J]. SPEJ, 1982,22(1):79-86.
- [8] NIEVES G, FERNANDEZ J, DALRYMPLE E D, et al. Field application of relative permeability modifier in Venezuela[R]. SPE 75123, 2002.
- [9] EOFF L S, REDDY B R, DALRYMPLE E D. Reducing subterranean formation water permeability: EP, 1193365A1[P]. 2002-04-03.
- [10] EOFF L S, DALRYMPLE E D, REDDY B R, et al. Development of a hydrophobically modified water-soluble polymer as a selective bullhead system for water-production problems[R]. SPE 80206, 2003.
- [11] DENYS K, FICHEN C, ZAITOUN A. Bridging adsorption of cationic polyacrylamides in porous media[R]. SPE 64984, 2001.
- [12] ZAITOUN A, KOHLER N, BOSSIE-CODREANU D. Water shutoff by relative permeability modifiers: lessons from several field applications[R]. SPE 56740, 1999.
- [13] DI LULLO G, RAE P. New insights into water control—a review of the state of the art[R]. SPE 77963, 2002.
- [14] SERIGHT R S. Optimizing disproportionate permeability reduction[R]. SPE 99443, 2006.
- [15] SYDANSK R D, SERIGHT R S. When and where relative permeability modification water shutoff treatments can be successfully applied[R]. SPE 99371, 2006.
- [16] BORODIN E G, VAKHROUSHEV P E, STOLYAROV S M, et al. Application of relative permeability modifiers to control water cut following hydraulic fracturing in western Siberia oil fields—Russian case-history study[J]. SPE Production & Operations, 2008,23(3):411-418.
- [17] 王鉴. 高价金属离子交联聚丙烯酰胺机理[D]. 东营:石油大学(华东)开发系,1991.
- [18] 李克华. 油田堵剂作用机理研究[D]. 东营:石油大学(华东)石油工程系,1997.
- [19] ZAITOUN A, RAHBARI R, KOHLER N. Thin polyacrylamide gels for water control in high-permeability production wells[R]. SPE 22785, 1991.
- [20] LIANG J, SUN H, SERIGHT R S. Reduction of oil and water permeabilities using gels[R]. SPE/DOE 24195, 1992.
- [21] WILLHITE G P, PANCAKE R E. Controlling water producing using gelled polymer systems[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008,11(3):454-465.
- [22] 赵福麟. 油田化学[M]. 东营:石油大学出版社,2000:142-143.
- [23] EOFF L S, DALRYMPLE E D, EVERETT D M. Global field results of a polymeric gel system in conformance applications[R]. SPE 101822, 2006.
- [24] VASQUEZ J, JURADO I, SANTILLAN A, et al. Organically crosslinked polymer system for water reduction treatments in Mexico[C]//54th annual southwestern petroleum short course meeting proceedings, Lubbock, Texas, April,25-26,2007:c450-458.
- [25] NEEDHAM R B, THRELKELD C B, GAIL J W. Control of water mobility using polymers and multivalent cations[R]. SPE 4747, 1974.
- [26] ZAITOUN A, KOHLER N. Thin polyacrylamide gels for water control in high-permeability production wells[R]. SPE 22785, 1991.
- [27] WILLHITE G P, ZHU H, NATARAJAN D, et al. Mechanisms causing disproportionate permeability in porous media treated with chromium acetate/HPAAM gels[R]. SPE 59345, 2000.

- [28] NILSSON S, STAVLAND A, JONSRATEN H C. Mechanistic study of disproportionate permeability reduction[R]. SPE 39635, 1998.
- [29] REDDY B R, EOFF L S, DALRYMPLE E D, et al. Natural polymer-based compositions designed for use in conformance gel systems[R]. SPE 84510, 2003.
- [30] CHAUVETEAU G, TABARY R, BLIN N, et al. Disproportionate permeability reduction by soft preformed microgels[R]. SPE 89390, 2004.
- [31] ROUSSEAU D, CHAUVETEAU G, RENARD M, et al. Rheology and transport in porous media of new water shutoff/conformance control microgels[R]. SPE 93254, 2005.
- [32] ROUSSEAU D, TABARY R, ZAITOUN A, et al. New microgels for EOR—from laboratory to field applications [C]//14th EAGE improved oil recovery European symposium proceedings, Cairo, Egypt, April, 22-24, 2007: A10.
- [33] COZIC C, ROUSSEAU D, TABARY R. Broadening the application range of water shutoff/conformance control microgels; an investigation of their chemical robustness [R]. SPE 115974, 2008.
- [34] HIRASAKI G J, MILLER C A. Reducing water permeability in subterranean formation: EP, 1312753A [P]. 2003-05-21.
- [35] BHIDE V, HIRASAKI G, MILLER C, et al. Foams for controlling water production[R]. SPE 93273, 2005.
- [36] 李兆敏, 孙茂盛, 林日亿, 等. 泡沫封堵及选择性分流实验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 115-118.
LI Zhao-min, SUN Mao-sheng, LIN Ri-yi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 115-118.
- [37] ROMELO L, KANTZAS A. The effect of wettability and pore geometry on foamed gel blockage performance in gas and water producing zone[R]. SPE 89388, 2004.
- [38] MCAULIFFE C D. Oil-in-water emulsion and their flow properties in porous media[J]. JPT, 1973, 25(6): 727-733.
- [39] MCAULIFFE C D. Crude-oil-water emulsions to improve fluid flow in an oil reservoir [J]. JPT, 1973, 25(6): 721-726.
- [40] ROMERO L, ZIRITT J L, MARIN A, et al. Plugging of high permeability fractured zones using emulsions[R]. SPE 35461, 1996.
- [41] SUNIL K. Crude oil emulsions: a state-of-the-art review [J]. SPE Production & Facilities, 2005, 20(1): 5-13.
- [42] ZEIDANI K, POLIKAR M, HUANG H, et al. Application of emulsion blocking mechanism for sealing the near wellbore region [J]. JCPT, 2008, 47(5): 40-47.
- [43] DARWISH M I M, VAN BOVEN P, HENSENS H C. Porous media flow of oil dispersion in polymers [R]. SPE 56741, 1999.
- [44] FRIEDMAN R H. Methods for selective plugging: US, 3865189 [P]. 1975-02-11.
- [45] TAYLOR K C, NASR-EL-DIN H A. Thermally responsive aqueous silicate mixture: WO, 2004/013460 [P]. 2004-02-12.
- [46] NASR-EL-DIN H A, TAYLOR K C. Evaluation of sodium silicate/urea gels used for water shut-off treatments [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2005, 48(3/4): 141-160.
- [47] BAUER S, GRONEWALD P, MANSURE A, et al. High temperature plug formation with silicates [R]. SPE 92339, 2005.
- [48] 鲍华. 耐高温耐盐硅酸盐堵剂的室内研究[J]. 断块油气田. 2008, 15(2): 75-77.
BAO Hua. Lab study on silicate plugging agent with temperature and brine tolerance [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(2): 75-77.
- [49] 刘巍. 水溶性硅酸盐堵剂研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2008.
- [50] DOLLARHIDE F E. Selective prevention of water and brine intrusion into mineral producing strata: US, 3181611 [P]. 1965-05-04.
- [51] GRATTONI C A, JING X D, ZAMMERMAN R W. Disproportionate permeability reduction when a silicate gel is formed in-situ to control water production [R]. SPE 69534, 2001.
- [52] KARMAKAR G P, GRATTONI C A, ZIMMERMAN R W. Relative permeability modification using an oil-soluble gelant to control water production [R]. SPE 77414, 2002.
- [53] KALFAYAN L J, DAWSON J C. Organosilicone-containing compositions for controlling water production: GB, 2399364A [P]. 2004-09-15.
- [54] MCKOWN K W, ROTHENBERGER D. Methods of selectively reducing the water permeabilities of subterranean formations: US, 5181568 [P]. 1993-01-26.
- [55] BEARDEN W G. Shutting off water in wells: US, 2946383 [P]. 1960-07-26.
- [56] MORGAN J, GUNN A, FITCH G, et al. Development and deployment of a “bullheadable” chemical system for selective water shut off leaving oil/gas production unharmed [R]. SPE 78540, 2002.
- [57] DER SARKISSIAN J, PRADO M, RAUSEO O. Lessons learned from selective water-shutoff treatments in mature reservoirs in Maracaibo lake [R]. SPE 95628, 2005.
- [58] 戴彩丽. 油井选择性堵水技术[D]. 东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2006.
- [59] 崔志昆, 王业飞, 马卫东, 等. 一种新型选择性堵水

- 技术及其现场应用[J]. 油田化学, 2005, 22(1): 35-37, 41.
- CUI Zhi-kun, WANG Ye-fei, MA Wei-dong, et al. A new selective water plugging technology and its field application [J]. Oilfield Chemistry, 2005, 22(1): 35-37, 41.
- [60] 戴彩丽, 赵福麟, 焦翠, 等. 冻胶泡沫在火烧山裂缝性油藏油井堵水中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(1): 129-132.
- DAI Cai-li, ZHAO Fu-lin, JIAO Cui, et al. Applications of gelled foam on production well water shutoff in HuoShaoShan fractured oil reservoir [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(1): 129-132.
- [61] 赵福麟, 戴彩丽. 对塔河油田堵水工作的建议[C]//中石化西北油田分公司采油工程技术研讨会论文集. 新疆乌鲁木齐, 2008: 142-150.
- [62] 赵福麟, 戴彩丽, 王业飞. 对塔河油田堵水工作的一些思考[C]//中石化西北油田分公司采油工程技术研讨会论文集. 新疆乌鲁木齐, 2009: 72-78.
- [63] WILLHITE G P, PANCAKE R E. Controlling water production using gelled polymer systems [R]. SPE 89464, 2004.
- [64] PORTWOOD J T. The Kansas Arbuckle formation: performance evaluation and lessons learned from more than 200 polymer-gel water shutoff treatments [R]. SPE 94096, 2005.
- [65] EOFF L S, DALRYMPLE E D, EVERETT D M, et al. Worldwide field applications of a polymeric gel system for conformance applications [R]. SPE 98119, 2006.
- [66] DEMIR M, TOPGUDER N N, YILMAZ M, et al. Water shutoff gels improved oil recovery in naturally fractured Raman heavy oilfield [R]. SPE 116878, 2008.
- [67] DIAZ G, CASTILLO P, LOMAS P E, et al. Fracture conformance treatments using RPM: efficiency and durability evaluation [R]. SPE 122913, 2009.

(编辑 刘为清)

(上接第 72 页)

参考文献:

- [1] 梁春秀, 康伟力, 曹跃, 等. 吉林探区深层天然气地质特征及勘探方向[C]//贾承造. 松辽盆地深层天然气勘探研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [2] 邹才能, 李明, 刘晓, 等. 松辽盆地深层火山岩及其油气预测技术研究[C]//贾承造. 松辽盆地深层天然气勘探研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [3] 邹玮, 李瑞, 汪兴旺. BP 神经网络在致密砂岩储层识别中的应用[J]. 石油工业计算机应用, 2006, 14(2): 19-21.
- ZOU Wei, LI Rui, WANG Xing-wang. The application of BP neural network in identification of the compact sandstone reservoir [J]. Computer Applications of Petroleum, 2006, 14(2): 19-21.
- [4] 廖觉生, 司马立强, 赵治春. 模糊聚类分析综合判别气水层方法[J]. 地球物理测井, 1991, 15(2): 100-112.
- LIAO Jue-sheng, SI-MA Li-qiang, ZHAO Zhi-chun. An integrated method of distinguishing gas and water bearing beds using fuzzy clustering analysis [J]. Geophysics Well Logging, 1991, 15(2): 100-112.
- [5] 刘洪林, 朱秋影, 周振兴. 模糊聚类分析及其在测井识别油气层中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(6): 425-427.
- LIU Hong-lin, ZHU Qiu-ying, ZHOU Zhen-xing. Fuzzy cluster analysis and its application of reservoir bed with logging data [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28(6): 425-427.
- [6] 侯俊胜, 黄智辉, 汪嘉联. 测井多参数模糊综合评判和灰色综合评判的对比分析[J]. 测井技术, 2000, 24(1): 32-35.
- HOU Jun-sheng, HUANG Zhi-hui, WANG Jia-lian. A comparison of fuzzy and grey integrated diagnosis methods using log multi-parameter information [J]. Well Logging Technology, 2000, 24(1): 32-35.
- [7] 潘和平, 樊政军, 马勇. 基于信息熵识别油气层和水层的聚类方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 31-34.
- PAN He-ping, FAN Zheng-jun, MA Yong. Clustering method for identification of oil (gas)-bearing formation and water-bearing formation based on information entropy [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 31-34.
- [8] 赵军. 模糊灰关联分析法在测井识别油气水层中的应用[J]. 测井技术, 2000, 24(5): 337-339.
- ZHAO Jun. Application of fuzzy grey correlation analysis method to the identification of oil/gas and water zones [J]. Well Logging Technology, 2000, 24(5): 337-339.
- [9] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1983: 64-75.
- [10] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1992: 20-53, 114-123.
- [11] 雍世和, 洪有密. 测井资料综合解释与数字处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 125-141, 277-311.
- [12] 刘光祖. 概率论与应用数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 61-66, 118-126, 181-192.
- [13] 陈亚力, 袁亚峥, 刘诚. 概率论与数理统计[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008: 29-51.
- [14] 肖位枢. 模糊数学基础及其应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992: 44-47.

(编辑 李志芬)